



## **SUURYRITYSTEN ILMASTORISKIN MALLINTAMINEN FAIR-OHJELMISTOLLA**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Laskennallisen tekniikan koulutusohjelma, Kandidaatintyö

2023

Saara Hirvo

Ohjaajat: Lassi Roininen  
Heikki Haario

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
School of Engineering Science  
Laskennallinen tekniikka

Saara Hirvo

## **Suuryritysten ilmatoriskin mallintaminen FaIR-ohjelmistolla**

Kandidaatintyö

2023

16 sivua, 9 kuvaa

Ohjaajat: Lassi Roininen ja Heikki Haario

Avainsanat: FaIR, ilmastomalli, XDC-malli

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ilmatoriskien hallinta on tärkeä osa yritysten toimintaa. Hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC (Intergovernmental panel on climate change) mukaan talouskasvuun kohdistuvien riskien ennustetaan kasvavan, kun ilmaston lämpeneminen on 1.5 astetta. Tulevan ilmaston ennustaminen vaatii suurteholaskentaa. Finite Amplitude Impulse Response (FaIR) -malli on yksinkertaistettu ilmastomalli, jolla voidaan tehdä kevyemmin päästöpohjaista skenaariolaskentaa. Taloudellisella ilmastovaikutusmallilla eli X-Degree Compatibility (XDC) -mallilla, tehdään ilmaston lämpenemisen asteeseen pohjautuvaa, tulevaisuuteen suuntautuvaa skenaariomallinnusta. Tässä työssä käytetään FaIR-mallia lämpötilaennusteiden mallintamiseen. Ennusteiden luominen suoritetaan MATLAB-ohjelmiston avulla. Ennusteiden perusteella analysoidaan yritysten ilmatoriskiä. Herkkyysanalyysin perusteella huomataan, että XDC-päästöjä on vähennettävä merkittävästi, jotta pysytään halutulla tasolla päästöjen suhteen.

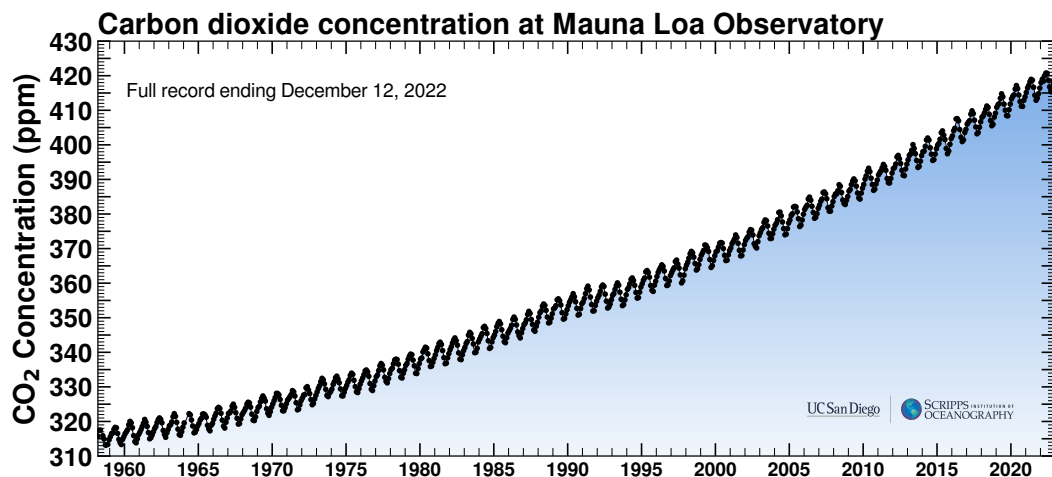
## Sisältö

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>4</b>
1.1 Tausta . . . . .	4
1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja rajaus . . . . .	5
1.3 Työn rakenne . . . . .	5
<b>2 ILMASTOMALLIT</b>	<b>6</b>
<b>3 AINEISTO JA OHJELMISTOT</b>	<b>8</b>
<b>4 LÄMPÖTILAENNUSTEET</b>	<b>9</b>
4.1 Herkkyysanalyysi . . . . .	9
4.2 Analyysia suurille pankeille . . . . .	11
4.3 RWE AG, Volkswagen AG ja Alphabet Inc. . . . .	12
<b>5 YHTEENVETO</b>	<b>15</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>16</b>

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Ihmisen toiminta vaikuttaa ilmastoon, sillä suurin osa, mitä tuotamme ja kulutamme, synnyttää kasvihuonekaasuja. Hiilidioksi on yleisin kasvihuonekaasu. Mauna Loa on suurin aktiivinen tulivuori, ja hiilidioksidin konsentraatiota mitataan sen huipulta. Mauna Loan Observatoriossa mitataan hiilidioksidipitoisuuksia sekä muita ilmakehän elementtejä, jotka vaikuttavat ilmastomuutokseen. Hiilidioksidin kertymisestä muodostuvaa kuvaajaa kutsutaan Keelingin käyräksi, jota visualisoidaan kuvassa 1. [1]



**Kuva 1.** Keelingin käyrä, jonka hiilidioksidipitoisuudet lähtevät vuodesta 1958 [1]

Tulevaa ilmastoa pystytään ennustamaan ilmastomalleilla. Ilmastomallit vaativat suurteholaskentaa. Finite Amplitude Impulse Response (FaIR) -malli on yksinkertaistettu ilmastomalli, jolla voidaan suorittaa päästöperusteista skenaariolaskentaa vähemmällä laskentateholla.

Aleksandr Zinovev opinnäytetyössään tutkii FaIR -mallin parametrien ja syötteiden epävarmuustekijöitä [2]. Näiden perusteella FaIR:n ulostulot saavat erilaisia arvoja. Zinovev hyödyntää Markovin ketju Monte Carlo (MCMC) -menetelmiä epävarmuustekijöiden tutkimisessa. Lisäksi Zinovevin opinnäytetyössä FaIR -mallin toiminta on selitetty kolmessa osassa. Tämä tapahtuu FaIR:n ulostulojen eli keskimääräisen kasvihuonekaasupitoisuuden, säteilypakotteen ja lämpötilan muutoksen laskemiseen. [2]

Zinovevin opinnäytetyöhön perustuva Degrees of Uncertainty kokoaa ilmatoriskien hallintaan käytettävät mallinnusmenetelmät. Tässä paperissa pyritään löytämään taloudellisen ilmastovaikutus, X-Degree Compatibility (XDC) -mallin epävarmuustekijöitä. Kun lämpötilaprojektiot suuntautuvat tulevaisuuteen, simulaatioiden minimi- ja maksimilämpötilojen ero kasvaa, luoden lisää epävarmuutta. Lisäksi, jos yrityksessä on huomioitu tavoite ylä- ja alarajalla, niin lämpötila saavutetaan herkemmin lähellä ylärajaa. Nämä tulokset osoittavat, että vaikka lämpötila-arvioiden vaihteluväli on hyvin pieni, saadaan epävarmuustekijöiden avulla tehtyä riittävää riskienarviointia. [3]

Hallitustenvälinen ilmastopaneeli, Intergovernmental panel on climate change (IPCC) selvittää tietoa ilmastomuutoksesta, ja julkistaa raportteja näistä tutkituista tiedoista. Maapallon keskilämpötila on noussut noin yhden asteen 1800-luvun esiteollisesta ajasta nykyhetkeen. Ilmatoriskien talouskasvuun kohdistuvien riskien ennustetaan kasvavan, kun ilmaston lämpeneminen on 1.5 astetta, ja sitäkin enemmän kun lämpeneminen on kaksi astetta. [4]

## **1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja rajaus**

Työssä tutkitaan FaIR-ilmastomallin soveltuvuutta ennustaa ilmatoriskiä suuryrityksille. Työn tavoitteena on ilmaston lämpenemisen tunnusluvuilla ja hiilidioksidipäästöillä tutkia yksinkertaista ilmastomallia, joka kuvaa ilmatoriskiä. Mallia analysoidaan eri suuryritysten avulla, ja näin myös tutkitaan sen toimivuutta. Työ on rajattu tutkimaan vain FaIR-mallin parametrien epävarmuutta.

## **1.3 Työn rakenne**

Työn luvussa 2 perehdytään ilmastomalleihin. Luvussa 3 kerrotaan lyhyesti työssä käytettävistä datasta ja ohjelmistoista. Teoriaosuuden jälkeen esitetään herkkyyksianalyysillä saadut tulokset luvussa 4. Lopuksi luvussa 5 on yhteenveto.

## 2 ILMASTOMALLIT

Ilmastomallit ovat simulaatioita, joilla ennustetaan ilmastoa, jota säätelevät fysiikan lait. Ilmastomallit ennustavat alueellisia eroja, ja niihin kuuluu ilmastojärjestelmän tutkiminen. Ilmastomallit vaativat suurteholaskentaa. Esimerkiksi Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksella, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMVF) on yksi maailman suurimpia resursseineen tehdä tällaista suurteholaskentaa. ECMVF tuottaa numeerisia sääennusteita. [5]

Skenaariomallinnus on työkaluna yritysten riskien ja haavoittuvuuksien seuraamiseen. Tässä työssä tutkitaan erityisesti ilmatoriskiä. Ilmatoriski tarkoittaa, että ilmastonmuutos aiheuttaa riskejä yrityksen liiketoiminnalle. Se on ainutlaatuinen, mikä johtuu ilmatoriskin potentiaalisesta skaalautuvuudesta, luontaisista epävarmuuksista ja luontaisesta epälineaarisuudesta. Yrityksen tulee tunnistaa ja hallita ilmatoriskejä, sillä ne ovat yksi suurista uhista rahoitusjärjestelmän vakaudelle. [3]

FaIR-ohjelmalla luodaan dataa kasvihuonepäästöistä [6]. FaIR:lla voidaan tehdä päätöspohjaista skenaariolaskentaa vähemmällä laskentateholla. FaIR on siis yksinkertainen malli, jolla jäljitellään keskilämpötiloja.

Laajempaan kokonaisuuteen taloudellisella ilmastovaikutusmallilla, XDC-mallilla, integroidaan ilmastomalleja. XDC-mallilla analysoidaan ilmaston lämpenemisen astetta toteuttaen yhteensopivan taloudellisen kokonaisuuden eri skenaarioissa. Sillä ilmaistaan ilmaston lämpenemisen ennustetta, kun päästöintensiteetti olisi sama kuin kyseessä oleva kokonaisuus tietyn ajanjakson aikana. Tässä työssä XDC-mallilla tehdään tulevaisuuteen suuntautuvaa skenaariomallinnusta. Taloustieteissä XDC-mallin lisäksi ilmastomalleilla voidaan tutkia hiilidioksidipäästöjen määrää ilmakehässä, ilmaston lämpenemisen astetta ja skenaarioita sekä ilmatoriskiä. [7]

XDC-mallin toimintaperiaate on seuraavanlainen. Ensin määritetään päästöintensiteetti tietyssä vuonna. Päästöintensiteetille tehdään analyysi perustuen sen tulevaan kehitykseen. Analyysi pohjautuu skenaario-oletuksiin, jotka ovat päästöskenaario ja kemikaalialan yrityksen päästöt. Päästöskenaarion mukaan säteilyvoima saavuttaa  $8,5 \text{ W/m}^2$ :n vuosisadan loppuun mennessä, ja skenaariossa on korkeat peruspäästöt. Kemikaalialan skenaariossa oletetaan, että päästöt kasvasta tietyssä vuodesta tavanomaisen skenaarion mukaisesti tavoitevuoteen asti. Analyysin jälkeen päästöintensiteetin kehitystä verrataan tunnettuihin vertailuarvoihin ilmaston suorituskyvyn määrittämiseksi. XDC-malliin kuuluu oletus, että maailma toimisi tulevaisuudessa yhtä hyvin kuin nykyisin saman ajanjakson

verran ja johtaisi aikasarjan globaaleista päästöistä. [3]

### 3 AINEISTO JA OHJELMISTOT

Datan käsittely toteutetaan MATLAB:ssa (R2021b), joka on MathWorksin luoma tietokoneohjelmisto numeeriseen laskentaan. Fair Infinite Impulse Response (FaIR) -ohjelman pohjana on Python 2. FaIR käyttää kasvihuonekaasupäästöjä ja lyhytikäisiä ilmastoteikijöitä, ja ulostuloina ovat keskimääräinen kasvihuonekaasupitoisuus, säteilypakote sekä lämpötilan muutos. FaIR ladataan tietokoneelle, ja tässä työssä sitä ajetaan MATLAB:in kautta.

Aineistona käytetään Right. based on science:n dataa erilaisista XDC-päästöistä. Greenhouse Gas Protocol- standardin mukaan XDC-päästöt jaotellaan kolmeen luokkaan. Luokka 1 pitää sisällään kaikki yrityksen suorat kasvihuonepäästöt. Luokkaan 2 kuuluu puolestaan sähkön, höyryn tai lämmön kuluttamisesta peräisin olevat kasvihuonekaasupäästöt. Luokkaan kolme kuuluu kaikki loput epäsuorat kasvihuonepäästöt.

Right. based on science:n datan eli lämpötilojen ja vuosien perusteella FaIR muodostaa uusia lämpötilakäyriä. Nämä FaIR:n tuottamat ilmastomallit perustuvat differentiaaliyhtälöihin ja parametriestimointiin. FaIR on ladattu MATLAB:iin, jossa yksi tiedosto luo lämpötilakäyriä ja toisessa on valmiiksi annettua dataa. XDC-päästöjä muuttamalla saadaan erilaisia malleja, joita verrataan alkuperäiseen, ei XDC-päästöjä syötettyyn malliin. Eri yrityksille XDC-päästöt ovat keskiarvoja, kunkin yrityksen vuosien 2016-2019 päästöjen summasta. Tämä vuosikeskiarvo lasketaan yhteen alkuperäisen XDC-päästön kanssa, jolloin saadaan yrityksen lämpötilakäyrä kaikkine hiilidioksidipäästöineen.



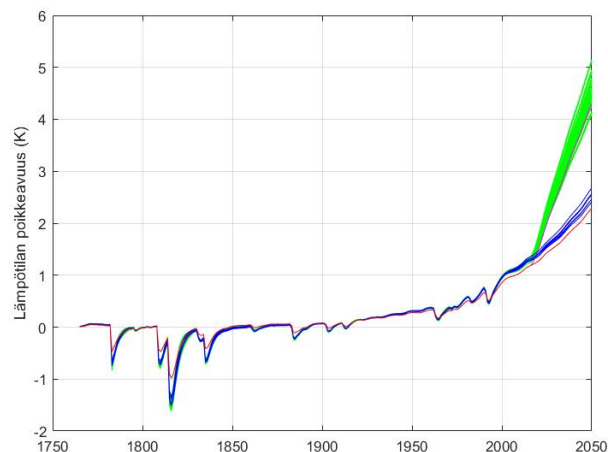
## 4 LÄMPÖTILAENNUSTEET

### 4.1 Herkkyysanalyysi

Annetun datan pohjalta FaIR tekee ilmastokäyriä. Käyrien perusteella saadaan lämpötilaennusteita. Tässä on valittu ennusteet vuoteen 2050 asti.

Tässä työssä simuloidaan erilaisia malleja muuttamalla XDC-päästöjä. Sen jälkeen yritetään löytää datalle sellaisia arvoja, että ilmastokäyrissä on nähtävillä vielä poikkeamia alkuperäiseen, XDC-päästöttömään malliin verrattuna.

Kun XDC-päästöjä ei ole vielä muutettu, lämpötila nousee neljään viiva viiteen asteeseen. Alkuperäinen FaIR-käyrä puolestaan on vähän yli kahden asteen. Kuvassa 2 nähdään alkuperäisen käyrän (sininen) ja XDC-päästö käyrän (vihreä) välillä selkeästi suuri ero.

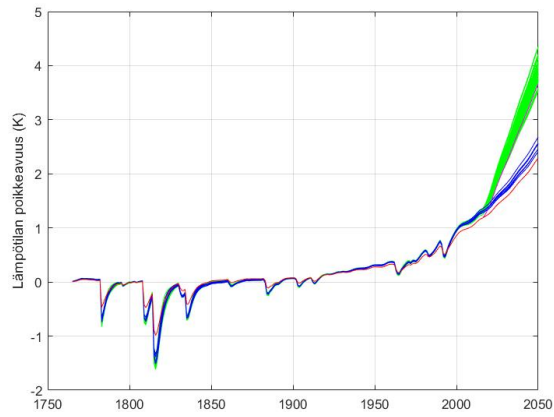


**Kuva 2.** FaIR:in omasta datasta muodostettu lämpötilakäyrä, jonka XDC-päästöjä ei ole muutettu.

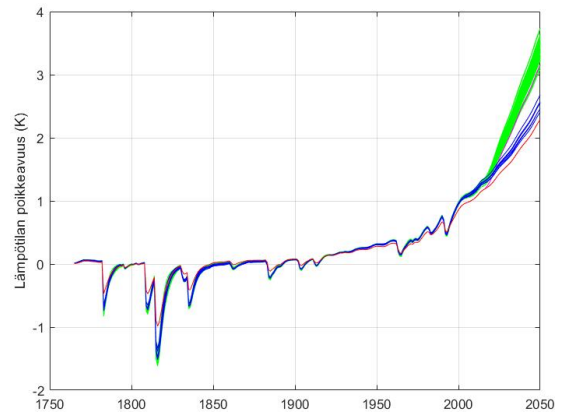
Muutetaan ensimmäiseksi XDC-päästöt 70%:iin. Edelleen huomataan suurehko poikkeama, mikä näkyy kuvassa 3a. Kun XDC-päästöjä vähennetään puoleen, huomataan ero, joka on kuitenkin jo paljon pienempi. Viidenkymmenen prosentin vähennys on kuvassa 3b.

Muutetaan seuraavaksi XDC-päästöt kolmeen kymmeneen prosenttiin. Käyrät eivät ole tasan päällekkäin, joten siinä on poikkeamia. Kun XDC-päästöt ovat 20%:ssa, nähdään, että alkuperäinen FaIR ja lisätyt XDC-päästöt ovat samassa kohdassa. Testataan 25%:n ja 15%:n XDC-päästöjä. Ensimmäiseksi mainitut päästöt näyttävät pientä poikkeamaa ylöspäin ja jälkimmäinen pientä poikkeamaa alaspäin. Näin ollen XDC-päästöjä voidaan vä-

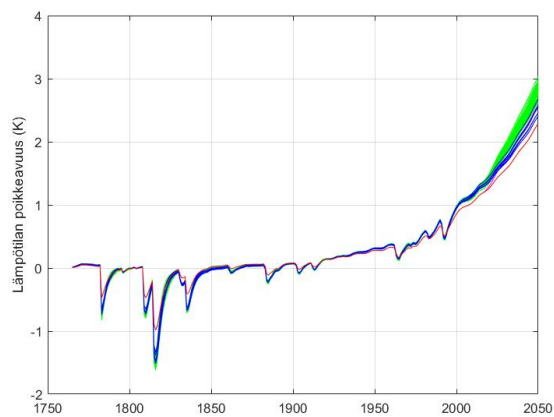
hentää 75%, jotta ilmastokäyrissä, kuvassa 3d, näkyy vielä poikkeamia.



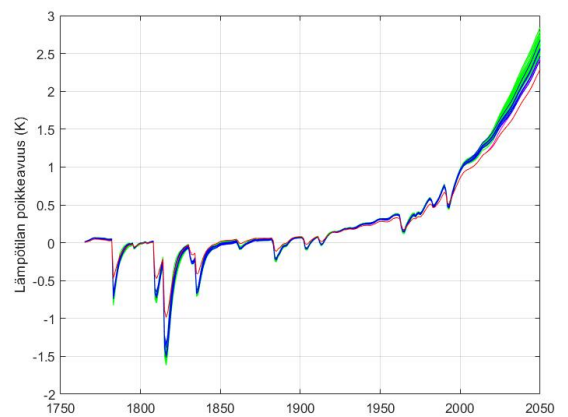
(a) XDC-päästöt 70%:ssa



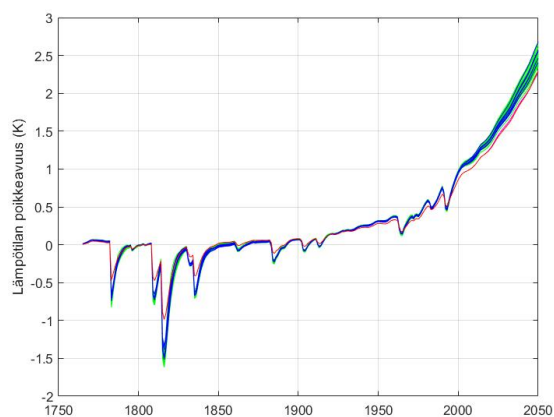
(b) XDC-päästöt 50%:ssa



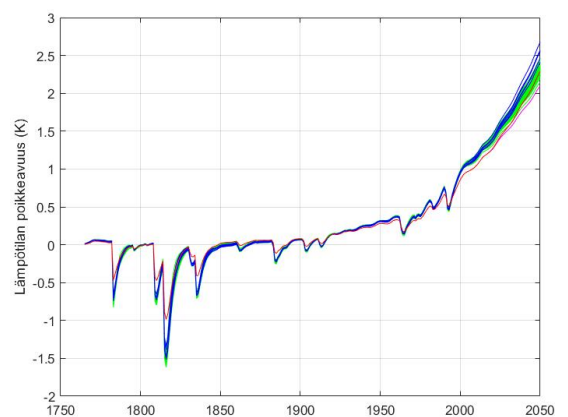
(c) XDC-päästöt 30%:ssa



(d) XDC-päästöt 25%:ssa



(e) XDC-päästöt 20%:ssa



(f) XDC-päästöt 15%:ssa

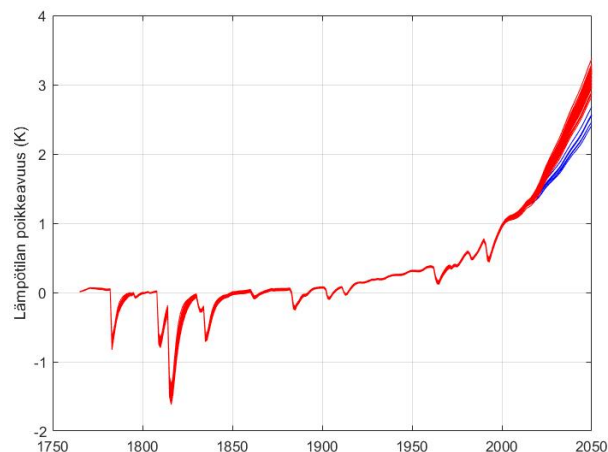
**Kuva 3.** Herkkyyksanalyysia XDC-päästöillä.

## 4.2 Analyysia suurille pankeille

Seuraavaksi käsitellään kuuden yrityksen XDC-päästöjä, jotka Right. based on science selvitti. Muutamalla suuryrityksen ilmastovaikutusmalleilla voidaan analysoida niiden ilmastoriskiä. Yrityksistä kolme on maailmanlaajuisia pankkeja: Deutsche Bank, Barclays PLC. ja Goldman Sachs Group Inc.

Ensimmäiseksi tehdään simulaatioita alkuperäisistä ja siihen lisätyistä päästöistä. Lisätyt päästöt ovat kunkin yrityksen vuosikeskiarvoja. Tästä saadaan kuvaajat, joissa näkyy sekä lämpötilakäyrä emissiolisäyksen kanssa että ilman lisäystä. Kun tehdään ennusteita tulevaisuuteen, tutkitaan tulevaisuuden epävarmuustekijöitä. Vuosikeskiarvot on otettu kustakin yrityksestä vuosien 2016-2019 päästödatasta. Datasta kerätään jokaisen vuoden päästöjen summa, joista otetaan keskiarvo. Vuosikeskiarvot kuvaavat tässä Fair-mallin parametrien epävarmuutta.

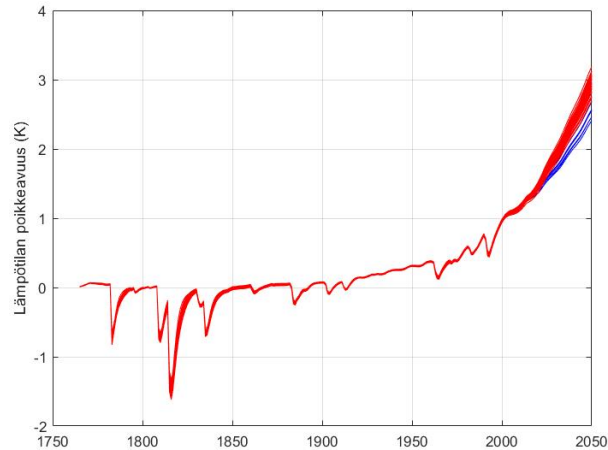
Deutsche Bank on saksalainen investointipankki, joka on maailman suurin. Punainen käyrä kuvaa lämpötilakäyrää emissiolisäyksen kanssa. Emissiolisäys on ennuste eli laskettu vuosikeskiarvo, joka Deutsche Bankilla on 13,08. Kuvassa 4 on lämpötilakäyrä Deutsche bankin XDC-päästöillä punaisella. Sininen käyrä kuvaa lämpötilakäyrää, joka on alkuperäinen FaIR käyrä.



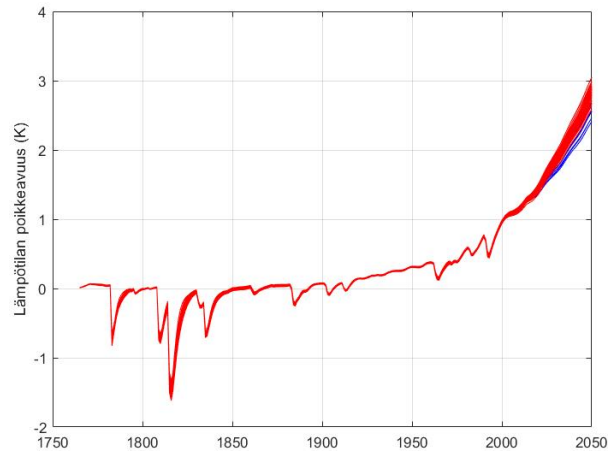
**Kuva 4.** Deutsche Bankin XDC-päästöt

Barclays PLC on iso-britannialainen yleispankki. Sen emissiolisäykseski on laskettu 9,5 astetta, ja sen lämpötilakäyrä on kuvassa 5. Goldman Sachs Group, Inc. on yksi maailman suurimmista liikepankeista. Sen vuosikeskiarvo on puolestaan 6,8 astetta. Kuvassa 6 on lämpötilakäyrä Goldman Sachs Groupin XDC-päästöillä.

Deutsche Bankin vuosikeskiarvo on selkeästi suurin. Kuvaajista huomaa hyvin eron alkuperäisen ja emissiolisäyskäyrän välillä. Mitä pienempi vuosilämpötilakeskiarvo on, sitä lähempänä XDC-lämpötilakäyrä on alkuperäistä käyrää.



**Kuva 5.** Barclays PLC:n XDC-päästöt

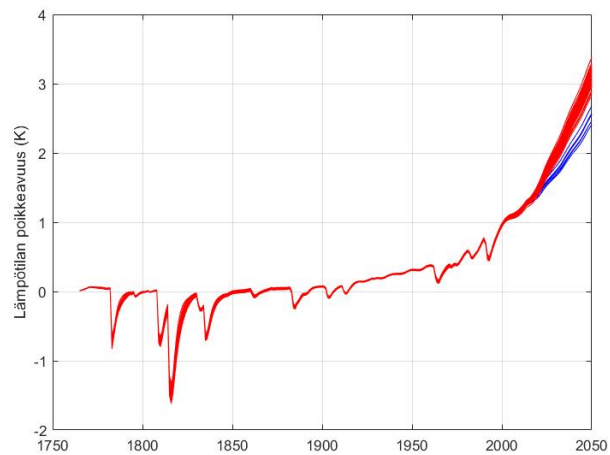


**Kuva 6.** Goldman Sachs Groupin XDC-päästöt

### 4.3 RWE AG, Volkswagen AG ja Alphabet Inc.

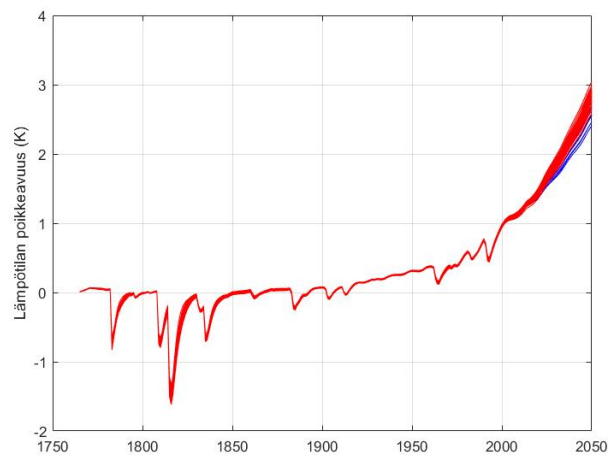
RWE AG on uusiutuvien energialähteiden toimittaja, joka on yksi suurimmista maailmanlaajuisesti. Sen emissiolisäys on 13,18 astetta, ja tämän lämpötilakäyrä on kuvassa 7.

Volkswagen AG on autoteollisuusyritys, ja on suurin autonvalmistaja Euroopassa. Volkswagenin ryhmään kuuluu kymmenen merkkiä: Volkswagen, Volkswagen Commercial Vehicles,



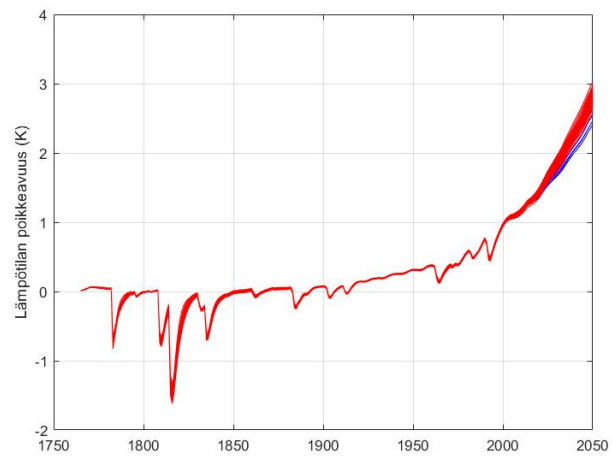
**Kuva 7.** RWE AG:n XDC-päästöt

ŠKODA, SEAT, CUPRA, Audi, Lamborghini, Bentley, Porsche ja Ducati [8]. Volkswagen AG:n vuosilämpötilakeskiarvo on pienin, jolloin lämpötilakäyrät ovat hieman päällekkäin. Volkswagenin emissiolisäykseksi on laskettu 6,73 astetta. Kuvassa 8 on lämpötilakäyrä Volkswagenin XDC-päästöillä.



**Kuva 8.** Volkswagen AG:n XDC-päästöt

Alphabet Inc on konserniyritys eli monialayritys. Se on maailmanlaajuinen teknologiayhtiö. Alphabet Incin suurin ja tunnetuin yritys on Google. Muita yrityksiä, joita Alphabet Inc hallinnoi, ovat muun muassa Verily Life Sciences, GV, Calico ja X. Alphabetin emissiolisäys on 6,40, ja sen lämpötilakäyrä on kuvassa 9.



**Kuva 9.** Alphabet Inc:in XDC-päästöt

## 5 YHTEENVETO

Simulaatioiden avulla tuotetaan ilmastomalleja, jotka antavat ennusteita lämpötiloista. Yksinkertaisella FaIR-mallilla jäljitellään keskilämpötiloja, ja saadaan lämpötilakäyriä. XDC-mallilla saadaan taloudellisen kokonaisuuden näkökulma näillä ennusteilla.

Right based on science:n datalla kuuden yrityksen XDC-päästöistä tehdään analyysia lämpötilaennusteista. Herkkyysanalyysista huomataan, että XDC-päästöjä on vähennettävä merkittävästi, jotta pysytään ilman yritysten aiheuttamien XDC-päästöjen muodostaman alkuperäisen lämpötilakäyrän tuntumassa. Deutsche Bankin ja RWE AG:n emissiolisäykset ovat suurimmat. Nämä arvot tarkoittavat suurimpaa poikkeamaa alkuperäisen ja emissiokäyrän välillä. Yrityksillä on siten tärkeä tehtävä pienentää omaa hiilijalanjälkeään.

Tässä työssä tutkittiin vain FaIR-mallin parametrien epävarmuutta. Epävarmuutta voitaisiin arvioida myös FaIR-mallin syöttötietojen perusteella. Jatkotutkimuksia ajatellen syöttötietojen, etenkin vuosittaisten arvioitujen hiilidioksidipäästöjen, merkitysten analysointi on ilmeistä.

## LÄHTEET

- [1] C. D. Keeling, S. C. Piper, R. B. Bacastow, T. P. Whorf, M. Wahlen, M. Heimann, and H. A. Meijer. Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. 2001.
- [2] A. Zinovev. Uncertainty quantification of FaIR climate model. Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, 2020.
- [3] T. Baumann, H. Haario, H. P. Hafner, J. Pellegrino, M. Simon, H. Stringham, and A. Zinovev. Degrees of uncertainty – quantifying uncertainties of temperature alignment metrics for climate risk management [White paper]. <https://www.right-basedonscience.de/en/reports/degrees-of-uncertainty-2022/>, 2022.
- [4] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). Summary for policymakers. in: Global warming of 1,5°C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>, 2018.
- [5] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://www.ecmwf.int/en/about>.
- [6] C. J. Smith, P. M. Forster, M. Allen, N. Leach, R. J. Millar, G. A. Passerello, and L. A. Regayre. FAIR v1.1: A simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. 2017.
- [7] H. Helmke. XDC – a powerful instrument. <https://www.right-basedonscience.de/en/xdc-model/>.
- [8] Volkswagen AG. <https://www.volkswagenag.com/>, 2023.